بررسی ترشوندگی و سایر خواص فیزیکی ذرّات کنسانترهٔ سنگ‌آهن‌های مصرفی در واحد گندله‌سازی شرکت فولاد مبارکه*

مهدی علی‌زاده[۱] محسن علی‌زاده[۲]

چکیده

اساساً مشخّصات فیزیکی نظیر شاخص‌های ترشوندگی، اندازه، توزیع و شکل ذرّات کنسانتره‌های سنگ‌آهن بر قابلیّت گندله‌شوندگی و مشخصه‌های کیفی گندله خام تولیدی تأثیر به‌سزایی دارد. در این تحقیق، کیفیّت کنسانتره‌های مصرفی در واحد گندله‌سازی شرکت فولاد مبارکه، توسّط شاخص‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری شاخص ترشوندگی، نمونه‌هایی از دو توده سنگ معدن چادرملو با عیار پایین و عیار بالا و همچنین از سنگ معدن سنگان تهیّه و توسّط سیال‌های مختلف بررسی شد. جهت ارزیابی شکل، اندازه و توزیع ذرّات پودرهای کنسانتره مصرفی از میکروسکپ الکترونی روبشی، دستگاه اندازه‌گیری لیزری ذرّات به روش SLS و الک لرزان استفاده شد. از آزمون BET و فیشر برای تعیین توزیع تخلخل و سطح ویژه ذرّات بهره گرفته شد. بهترین ترشوندگی، مربوط به سنگ معدن چادرملو با عیار بالا است که توسّط محلول چسب آلی کربوکسیل‌متیل سلولز حاصل شده است. افزودن محلول سود به مخلوط مواد، موجب کاهش میزان ترشوندگی ذرّات شده است. متوسّط اندازه ذرّات در مخلوط مواد آسیاب شده دارای اندازه حدود ۱۰ میکرون به‌دست‌آمده که باعث توزیع نامناسب و تشکیل میکروآگلومره در پودر شده است. نتایج آزمون BET نشان داد که با توجّه به تخلخل بسیار کم ذرّات، سطح ذرّات از زبری پایینی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی کنسانتره سنگ‌آهن، گندله‌شوندگی، چسب آلی، ترشوندگی، توزیع اندازه ذرّات، میکروآگلومره.

Evaluation of the Wettability and Other Physical Properties of Iron Ore Particles that Consumed in the Pelletizing Plant of Mobarakeh Steel Co.

M. Alizadeh M. Alizadeh

Abstract

Mostly, the physical properties of iron ore particles such as wettability, size, size distribution and morphology have important effects on the pellet ability of powder mixtures and quality of green pellet. In this work, these physical properties of particles used in the pelletizing plant of Mobarakeh Steel Co. were studied. The wettability of iron ore particles was evaluated using different wetting media and the samples which were prepared from lumps of low and high purity iron ores (received from Chadormalu and Sangan). The scanning electron microscope, laser diffraction particle sizing measurement (SLS method) and sieve screening experiments were used to evaluate the shape, size and size distribution of particles. The BET and Fisher tests were employed to determine the pore distribution and specific surface area, respectively. The high wettability was measured for high-grade Chadormalu iron ore when Carboxymethyl cellulose organic binder solution was used. The results also showed that the NaOH addition reduces the wettability of iron ore. The average particle size of milled concentrate in the mixed materials was measured around 10µm. The small particle sizes facilitate the formation of micro-agglomerates in powder and the consequent reduction of capillary pressure during the pellet forming. The results of BET experiment also revealed the reduction in porosity and roughness of particles surfaces.

Key words Iron ore concentrate, Ballability, Organic binder, Wettability, Particle size distribution, Micro-agglomerates.

---

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹٦/۲/۱۷ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹٦/۱۰/۲٦ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Email: alizadeh@iut.ac.ir

(۲) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکدهٔ مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان.

DOI: 10.22067/ma.v31i1.63993

مقدمه

اساساً گندله‌سازی، به‌منظور استفاده آسان از نرمه‌های سنگ‌آهن با اندازهٔ کوچک، برای تولید فولاد، در دهه ۱۹۵۰ شروع شد. در این فرایند مخلوط کننده‌هایی در قسمت ورودی دیسک‌های گندله‌سازی وجود دارد که مواد شارژ آن‌ها شامل نرمه (fine)، رطوبت (لجن) و چسب (معمولاً بنتونیت) است. مقدار رطوبت بهینه، علاوه بر تخلخل بین ذرّات و مقدار بنتونیت، به اندازه، توزیع، زبری سطح و قابلیّت ترشوندگی ذرّات جامد وابسته است [1,2]. هرچقدر میزان ترشوندگی (wettability) ذرّات کنسانتره افزایش یابد، به لحاظ وجود نیروهای کشش سطحی سیال و فشار ناشی از لوله‌های موئین، جوانه‌زنی و رشد مناسبی در فرایند تشکیل گندله ایجاد می‌شود. ترشوندگی با اندازهٔ زاویهٔ تماس بین مایع و سطح ذرّه، اثر عکس دارد. به معنای دیگر، با کاهش زاویهٔ تماس، ترشوندگی ذرّه بیش‌تر می‌شود [3]. بنابراین، ترشوندگی ذرّات سنگ‌آهن، یکی از عوامل اثرگذار بر گندله‌شوندگی است. فرایندهای مختلفی وجود دارند که موجب افزایش خاصیّت ترشوندگی ذرّات سنگ‌آهن می‌شوند. تزریق بخار داغ آب به داخل میکسر، اصلاح فرایند شناورسازی (flotation) و استفاده از چسب آلی به‌جای بنتونیت ازجمله موارد اصلاح سازی ترشوندگی ذرّات سنگ‌آهن است. استفاده از بخار آب یک روش مناسب برای تر نمودن ذرّات با چگالی پایین است [4]. روش دیگر حذف و یا کاهش عوامل ناخالصی (گانگ) و بنتوینت مصرفی در مخلوط مواد است. بنتونیت علاوه بر کاهش ترشوندگی سیال، باعث می‌شود که مواد باطله همچون سلیکا را وارد محصول کند و سعی بر آن است که میزان مصرف بنتونیت در گندله‌سازی کاهش پیدا کند [5,6]. چسب‌های آلی بهترین جایگزین بنتونیت است که دارای خاصیّت ترشوندگی فوق‌العاده بالایی است. در سال ۲۰۰۳ کیو (Qiu) و همکارانش راهکارهای عملی در خصوص جایگزینی چسب‌های پلیمری بجای بنتونیت ارائه دادند [۷]. آن‌ها دو چسب آلی به نام‌های S-1 و Funa را مورد مطالعه قرار دادند. چسب S-1 دارای دو اتصال آب‌دوست و آنیونی است. نتایج نشان داد که با افزودن چسب S-1 به نرمه کنسانتره مگنتیتی با توزیع ۸۶/۱۰ درصد عبور از ۰/۰۷۴ میلی‌متر (مساحت سطح ویژه ۱۲۸۰ سانتی‌مربع بر گرم) و میزان رطوبت ۸/۱ درصد، بیشترین استحکام تر و خشک برای گندله نسبت به استفاده از بنتونیت حاصل شده است. آویسن (Iveson) و همکارانش در سال ۲۰۰۰ زاویهٔ تماس آب با کشش سطحی بالا (۷۲ mN/m) و سیلکوهگزان را روی سنگ‌آهن استرالیایی بررسی نمودند [3]. مشاهده نمودند که در سنگ‌های آهن ترکیبی اکسید/هیدروکسید با افزایش میزان هماتیت، زاویهٔ تماس زیاد می‌شود.

اندازه ذرّات نرمه، اثر قابل توجّهی بر نرخ رشد گندله خام دارد [۸]. عوامل اصلی که گندله‌شوندگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند شامل اندازه ذرّات، شکل ذرّات، میزان رطوبت، چسب و ترشوندگی خوب ذرّات هستند. معمولاً عدد سطح ویژه (بلین) مناسب در محدوده ۱۵۰۰ الی ۲۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم گزارش شده است که تقریباً این میزان عدد بلین معادل با ۷۵ الی ۹۵ درصد اندازه ذرّات زیر ٤۵ میکرون است. هرگونه اختلال در عوامل فوق، منجر به افزایش مواد برگشتی و ایجاد نوسانات در اندازهٔ گندله خام تولیدی می‌شود. در این خصوص، اطمینان از وضعیت فرایند خردایش کنسانتره به لحاظ اندازه و توزیع اندازه ذرّات، شکل، تخلخل و سطح ویژه ذرّات از اهمّیّت به‌سزایی برخوردار است. در سال ۲۰۱۵ پال (Pal) و همکاران اثر بلین نرمه را بر کیفیت گندله بررسی نمودند [9]. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش عدد بلین از ۱٦۲۸ تا ۲۱٤۵ سانتی‌متر مربع بر گرم، کیفیّت گندله به‌واسطهٔ تشکیل پل‌های اتصال جامد در اثر ریز شدن نرمه، بهبود می‌یابد. در این پژوهش، ضمن بررسی زاویهٔ تماس سیالات مختلف با سنگ‌آهن معادن مورد مصرف در فرایند گندله‌سازی شرکت فولاد مبارکه به مطالعه و بررسی دیگر خواص فیزیکی ذرّات (مانند اندازه و توزیع اندازه و شکل ذرّات) کنسانتره سنگ‌آهن‌های مصرفی پرداخته شده است.

روش تحقیق

جهت انجام تحقیق، نمونه‌هایی از دو سنگ معدن چادرملو و سنگان که عمدتاً مگنتیتی بوده و در شرکت فولاد مبارکه اصفهان به‌صورت کنسانتره استفاده می‌شوند، تهیه شد. با توجّه به رگه‌های مختلف سنگ‌آهن در معدن چادرملو،

نمونه‌برداری از دو نمونه سنگ عیار پایین و عیار بالا صورت گرفت. ترکیب شیمیایی نمونه سنگ‌آهن‌های مختلف در جدول (۱) نشان داده شده است. جهت اندازه‌گیری ترشوندگی از روش اندازه‌گیری زاویهٔ تماس(contact angle measurement) توسّط دوربین رنگی با بزرگ‌نمایی لنز ۲ برابر استفاده شد که اندازه‌گیری بر اساس روش LB-ADSA است (شکل ۱). جهت آماده‌سازی، سطح مقطع سنگ‌آهن پس از مانت شدن، تا سمباده ۱۰۰۰ صیقل داده شد. آزمون ترشوندگی یا تعیین زاویهٔ تماس دو نمونه قلوه‌سنگ (laumpur) از معادن چادرملو و سنگان با مایع آب مقطر، آب فرایند مصرفی در واحد گندله‌سازی (آب پروسس)، محلول ۵۰ درصد سود (NaOH)، محلول ۵۰ درصد چسب آلی دولاپیکس (Dolapix) و محلول چسب آلی کربوکسیل‌متیل سلولز (Carboxymethyl cellulose/CMC) انجام شد. در این روش در هر بار اندازه‌گیری سه قطره مایع در سه مکان مختلف سطح جامد (توده سنگ‌آهن آماده‌سازی‌شده) قرار داده و زاویهٔ تماس اندازه‌گیری شد. میزان دقت اندازه‌گیری توسّط این روش ۰/۰۱ درجه است. برای اندازه‌گیری توزیع و اندازه ذرّات، نمونه‌ها از مواد خروجی آسیاب (نمونهٔ A)، نرمه چادرملو (نمونهٔ C) و مواد خروجی از میکسر (نمونهٔ M) گرفته شد. مواد خروجی از میکسر شامل مخلوط مواد آسیاب‌شده سنگان و گل‌گهر همراه با ۵۰ درصد نرمه چادرملو، رطوبت (حدود ۸/۵ درصد) و بنتونیت (حدود ۰/۷ درصد) است که تحت عنوان مخلوط مواد (نمونهٔ M) معرفی شده است. همچنین، مواد شارژ آسیاب (یا نمونهٔ A) از دو سنگ سنگان و گل‌گهر تشکیل شده است. کد نمونه‌ها در جدول (۲) به‌طور کامل شرح داده شده است.

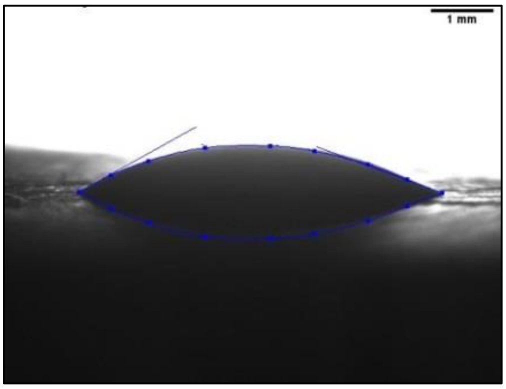
جهت مطالعه شکل، اندازه و توزیع کیفی اندازه ذرّات از میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. جهت بررسی اندازه ذرّات با SEM از روش بزرگ‌ترین خط افقی برای ۳۵ ذرّه توسّط نرم‌افزار Image J بهره گرفته شد. همچنین از دستگاه آنالیز لیزری اندازه ذرّات (particle size analyzer/PSA) با روش پراکندگی استاتیک نور لیزر (SLS) استفاده شد. اندازه‌گیری ذرّات با استفاده از روش پراکندگی استاتیک نور لیزر روشی بر اساس الگوی نور پراکنده‌شده روی آشکارساز است. این الگوی نور پراکنده‌شده، مجموعه‌ای از الگوهای پراکندگی است که توسّط هر یک از ذرّات ایجاد می‌شود. به‌وسیله این الگوی پراکندگی، می‌توان اطلاعاتی از اندازه ذرّات به دست آورد. علاوه بر این، از آزمون غربالگری با الک برای به دست آوردن توزیع اندازه ذرّات استفاده شد. در آزمون غربالگری با الک، پودر روی الک‌ها با مش‌های مختلف ریخته می‌شود و پس از ۱۵ الی ۲۰ دقیقه لرزش، ذرّات از الک‌های مختلف عبور نموده و وزن پودرهای باقی‌مانده روی هر الک اندازه‌گیری می‌شود. اطلاعات مربوط به سطح ویژه ذرّات بر اساس استاندارد ASTM B330 با استفاده از fisher scientific sub sieve sizer model 95 اندازه‌گیری شد. در روش فیشر از مقدار نفوذ هوا در بستر پودر در حالت پایدار به‌عنوان شاخص برای اندازه‌گیری سطح ویژه استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری تخلخل سطحی ذرّات با اندازه‌گیری ایزوترم گاز نیتروژن (در دمای ۷۷ درجه کلوین) توسّط دستگاه BET انجام شد.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی سنگ معادن چادرملو و سنگان

نوع سنگ‌آهن		Fe_{total}	FeO	P	SiO_2	TiO_2	S	Mn	MgO	CaO	Al_2O_3	V_2O_5
چادرملو	عیار پایین	۳۳/۶۶	۱۳/۴۸	۰/۵۷	۳۰/۰۰	۰/۷۶	۰/۰۴	۰/۰۲	۲/۵۴	۳/۰۰	۷/۶۰	۰/۱۷
	عیار بالا	۶۶/۸۱	۲۷/۱۷	۰/۶۱	۰/۸۳	۰/۱۳	۰/۳۳	۰/۰۲	۰/۱۱	۲/۴۷	۰/۰۴	۰/۲۸
سنگان		۵۵/۹۰	۱۵/۰۲	–	۹/۰	–	۰/۰۰۳	۰/۲۹	۰/۱۰	۶/۵۰	۱/۱۶	۰/۰۱

جدول (۲) معرفی و کدگذاری نمونه‌ها

ردیف	کد نمونه	نام نمونه	شرح
۱	A	بعد از آسیاب	شامل مخلوط سنگ سنگان و گل‌گهر
۲	C	چادرملو	نمونه چادرملو
۳	M	بعد از میکسر (یا مخلوط مواد)	شامل مخلوط مواد آسیاب‌شده سنگان و گل‌گهر همراه با ۵۰ درصد نرمه چادرملو، رطوبت (حدود ۸/۵ درصد) و بنتونیت (حدود ۰/۷ درصد) است

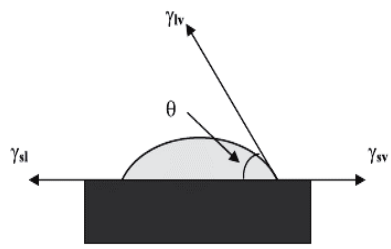


شکل (۱) تصویر مربوط به روش تعیین زاویهٔ تماس (محلول سود ۵۰ درصد روی سطح سنگ معدن چادرملو)

نتایج و بحث

ترشوندگی

میزان ترشوندگی جامد توسّط مایع، بر اساس زاویهٔ تماس مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است با افزایش زاویهٔ تماس بین مایع و جامد، میزان خیس‌کنندگی مایع کاهش یافته است [۱۰]. زاویهٔ تماس می‌تواند بر خواص گندله نهایی اثر بسزایی داشته باشد. به‌طوری‌که با کاهش زاویهٔ تماس بین سیال و ذرّات سنگ‌آهن با توجّه به رابطهٔ (۱) نیروی موئینگی زیاد می‌شود [3].



شکل (۲) طرح‌واره زاویهٔ تماس بین ذرّه و مایع

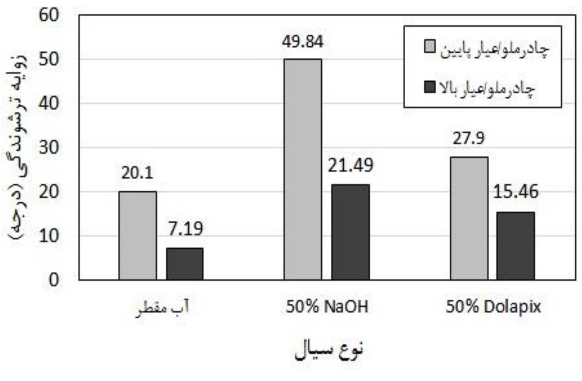
$$\Delta P_{cap} = \frac{2\gamma_{lv}\cos\theta}{r_{eff}} \quad (۱)$$

در این رابطه، ΔP_{cap} فشار موئینگی، γ کشش سطحی یا انرژی سطحی مایع، θ زاویهٔ تماس و r_{eff} شعاع متوسّط منفاذ مؤثر است. افزایش نیروی موئینگی علاوه بر افزایش استحکام تر گندله، باعث افزایش نرخ رشد (گندله‌شوندگی) گندله می‌شود. بنابراین همواره سعی بر آن است که زاویهٔ ترشوندگی ذرّات سنگ‌آهن کم شود. همچنین، در رابطهٔ (۲) مشخص است که با کاهش زاویهٔ تماس، ضریب گسترش زیاد می‌شود. بنابراین چسب باید به‌گونه‌ای باشد که زاویهٔ تماس را کاهش دهد. به‌طوری‌که در عمل بایستی جهت اصلاح چسب، افزودنی‌هایی با گروه‌های آب‌دوست (hydrophilic) استفاده شود [3].

$$S_H = \gamma_{lv}(\cos\theta - 1) \quad (۲)$$

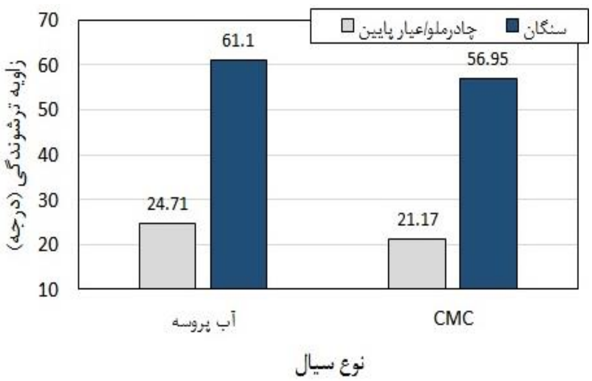
ترشوندگی به ترکیب شیمیایی، خواص فیزیکی و ترموفیزیکی سیال و ترکیب شیمیایی ذرّات سنگ‌آهن وابسته است. انتظار می‌رود که هر یک از اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن دارای زاویهٔ تماس منحصربه‌فردی بین سه فاز بخار- جامد- مایع داشته باشند. این تمایز به چگالی هیدروکسیل موجود در سطح نرمه و تعداد نسبی پیوندهای اکسیدی با اتم‌های آهن سطح وابسته است. به عبارتی، عاملی

مانند دما که موجب کاهش ظرفیت تعامل پیوند هیدروژن با آب می‌شود، زاویهٔ تماس را افزایش می‌دهد [11]. همچنین باید به این نکته توجّه شود که همراه با ذرّات سنگ‌آهن دو یا چند ماده معدنی مختلف (کانی) همراه با مواد باطله (گانگ) وجود دارد. در این‌گونه سنگ‌ها، نسبت کانی در سطح، عامل اصلی کنترل نمودن میزان ترشوندگی سنگ است. در شکل (۳) همان‌طور که مشخص است نمونه سنگ چادرملو با عیار بالا، زاویهٔ ترشوندگی کم‌تر (ترشوندگی بیش‌تر) نسبت به سنگ چادرملو با عیار پایین دارد. واضح است که با کاهش عیار، حضور مقدار گانگ (کانی‌های باطله) موجود در ترکیب سنگ بیش‌تر شده و اثر منفی بر خاصیّت ترشوندگی سنگ‌آهن داشته است (جدول۱). علاوه بر این مشخص است که آب مقطر دارای ترشوندگی مناسبی برای سنگ چادرملو است و سود منجر به افزایش زاویهٔ ترشوندگی شده است. بنابراین افزودن محلول سود به مخلوط مواد در فرایند تولید اگرچه ازیک‌طرف باعث افزایش فعالیت و جذب آب بیش‌تر بنتونیت می‌شود ولی از طرف دیگر میزان ترشوندگی سنگ‌آهن را در مقایسه با آب کاهش می‌دهد [12]. لذا مصرف بیش‌ازاندازه سود می‌تواند تأثیر معکوس بر فرایند گندله‌شوندگی داشته باشد.

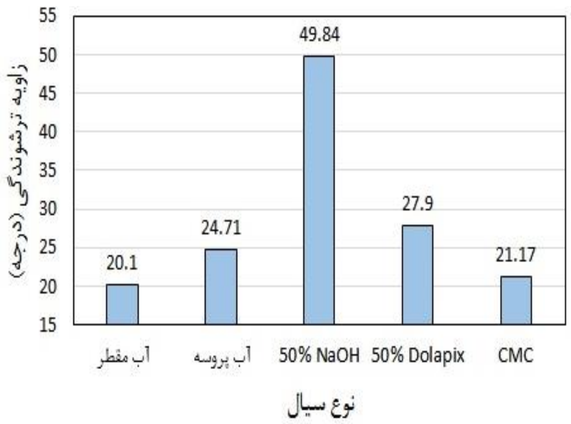


شکل (۳) تغییرات زاویهٔ تماس آب مقطر، سود و چسب آلی دولاپیکس با سنگ معدن چادرملو با عیارهای مختلف

مقایسهٔ بین زاویهٔ ترشوندگی سنگ معدن چادرملو (با عیار پایین) و سنگ معدن سنگان توسّط سیال آب پروسس (فرایند) و چسب آلی CMC در شکل (٤) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود به‌رغم عیار نسبتاً خوب سنگ معدن سنگان و مقدار گانگ کم‌تر آن در مقایسه با سنگ چادرملو با عیار پایین (جدول ۱) ولی قابلیّت ترشوندگی سنگ معدن سنگان در مقایسه با چادرملو ضعیف‌تر است. این موضوع به ماهیت ذاتی و ژنز سنگ مربوط می‌شود. در شکل (۵) زاویهٔ ترشوندگی انواع سیال‌های مختلف برای سنگ معدن چادرملو عیار پایین نشان داده شده است. مشخص است که سود موجب شده که ترشوندگی سنگ کاهش یابد. علاوه بر این، محلول چسب آلی CMC بهترین نتیجه را ایجاد نموده که نزدیک به آب مقطر است. گروه‌های آب‌دوست در ساختار شیمیایی چسب آلی CMC موجب افزایش خاصیّت ترشوندگی می‌شود. این در حالی است که محلول چسب آلی دارای حالت چسبندگی قوی‌تری (نیروی ویسکوز بیش‌تر سیال) در مقایسه با آب مقطر دارد. به‌طوری‌که محلول چسب آلی، علاوه بر ترشوندگی بیش‌تر ذرّات و درنتیجه افزایش فشار ناشی از لوله‌های موئین در بین ذرّات، می‌تواند باعث ایجاد اتصال بین ذرّات به‌واسطه نیروی ویسکوز شود. بنابراین چسب آلی CMC باعث افزایش استحکام تر و خشک گندله خام می‌شود [6].



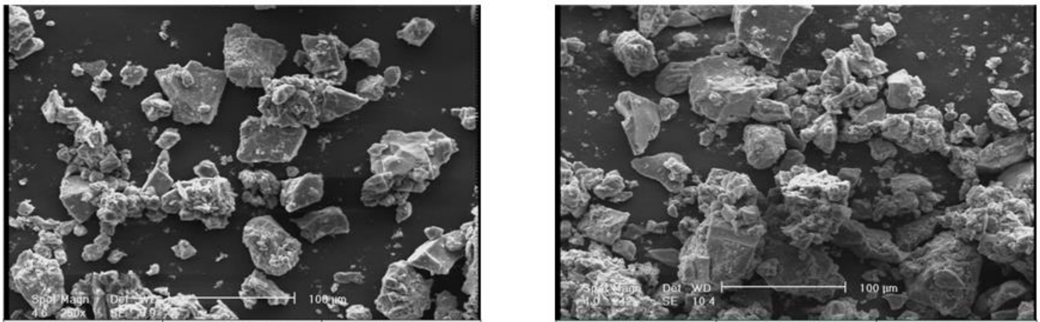
شکل (٤) مقایسهٔ زاویهٔ ترشوندگی آب پروسه و چسب آلی CMC روی سنگ معدن سنگان و چادرملو عیار پایین



شکل (۵): مقایسه زاویهٔ ترشوندگی آب مقطر، آب پروسه، سود ۵۰ درصد، چسب آلی دولاپیکس و CMC روی سنگ معدن چادرملو عیار پایین

توزیع، اندازه و سطح ویژه ذرّات و تخلخل‌ها

در شکل (٦) تصاویر SEM و نتایج حاصل از بررسی تصویر توسّط نرم‌افزار ImageJ برای ذرّات کنسانتره چادرملو (نمونه C) و مخلوط مواد (نمونه M) مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است متوسط اندازه ذرّات برای نمونه C و M به ترتیب حدود ۱۸ و ۲۳ میکرون به دست آمد. نتایج مربوط به اندازه‌گیری کمی اندازه و توزیع اندازه ذرّات توسّط روش SLS برای نمونه M در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیش‌ترین فراوانی توزیع ذرّات برای مواد مخلوط شده، بین ۱۱ الی ۱۵ میکرون است. علاوه بر این، نشان می‌دهد که حدود ۸۰ درصد ذرّات، دارای اندازه کم‌تر از ۲۰ میکرون است. به دلیل اینکه مواد مخلوط شده حاوی ذرّات بسیار ریز لجن و بنتونیت است و موجب ایجاد خطا در گزارش توزیع و اندازه ذرّات می‌شود، بنابراین، آزمون SLS برای نرمه آسیاب‌شده (نمونه A) که عاری از لجن و بنتونیت است، تکرار شد. نتایج آزمون در شکل (۸) نشان می‌دهد که حدود ۸۰ درصد ذرّات زیر ۲۵ میکرون هستند. نتایج آزمون PSA برای نمونه M و A در جدول (۳) به‌طور کامل مشخص شده است. این نتایج با داده‌های به دست توسّط آزمون غربالگری با الک برای نمونه A که در فرایند تولید و به‌صورت مداوم نمونه‌گیری و انجام می‌شود، مقایسه شده است (شکل ۹). جهت تبدیل نتایج آزمون غربالگری از درصد وزنی به درصد حجمی، چگالی ظاهری و واقعی مواد خروجی بعد از آسیاب (نمونه A) به ترتیب ٤/٢ و ٥/٠ گرم بر سانتی‌متر مکعب فرض شده است. همچنین سطح ویژه نرمه مواد مخلوط شده (نمونه M) توسّط روش فیشر حدود ۲۵۰۷ cm^2/g اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در نتایج آزمون اندازه‌گیری لیزری ذرّات برای نمونه A و M مشخص شده است (جدول ۳)، بیش‌ترین توزیع ذرّات دارای اندازه حدود ۱۰ میکرون هستند. این در صورتی است که بیش‌ترین توزیع اندازه ذرّات در آزمون غربالگری برای نمونه A در محدوده اندازه ذرّات ۲۰–۳۷ میکرون است. علّت اختلاف در نتایج دو روش اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرّات با الک و لیزر، ناشی از تشکیل میکروآگلوره‌ها در پودر در اثر ریز شدن زیاد از حد نرمه است. با کاهش اندازه ذرّات، نسبت سطح به حجم افزایش می‌یابد و سهم انرژی سطحی ذرّات قابل توجّه می‌شود. علاوه بر این، با حضور نیروهای مختلف الکتریکی، الکترواستاتیکی و مغناطیسی در بین ذرّات بسیار ریز، ذرّات با تجمع در کنار یکدیگر و تشکیل توده‌های کوچک، انرژی سطحی خود را تا سطح پایداری لازم، کاهش می‌دهند [13]. به‌طورکلی اتصال مکانیکی به وجود آمده بین ذرّات باعث شکل‌گیری میکروآگلومره در مواد مخلوط شده، می‌شود. ازآنجایی‌که در روش آزمون SLS این میکروآگلومره‌ها با فشار بالای هوای فشرده از هم جدا می‌شوند، به همین علت است که توزیع اندازه ذرّات به‌دست‌آمده توسّط دستگاه PSA بسیار متفاوت از نتایج آزمون غربالگری با الک است. زیرا در روش دانه‌بندی با الک امکان متلاشی شدن آگلومره‌ها با لرزش الک فراهم نخواهد بود و به دلیل جدانشدن ذرّات تجمع یافته در کنار یکدیگر، اختلاف فاحشی بین این دو روش آزمون حاصل شده است.



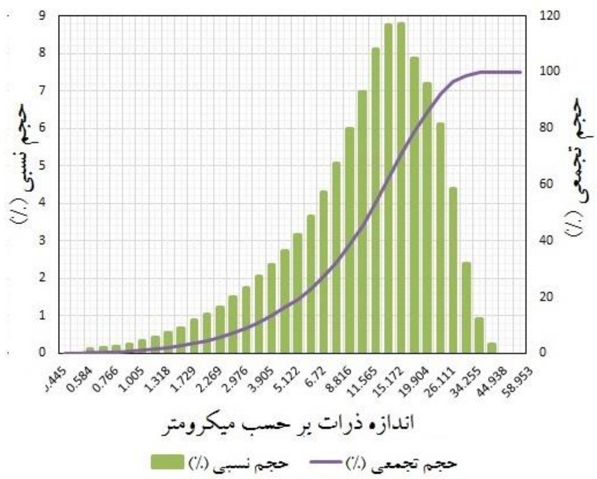
بیشینه اندازه ذرات µm	کمینه اندازه ذرات µm	متوسط اندازه ذرات µm
47±1	4±1	18±1

ب) نرمه چادرملو

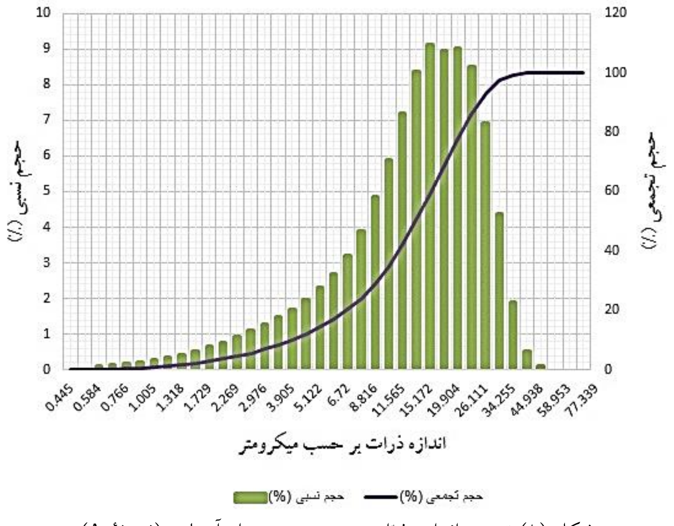
بیشینه اندازه ذرات µm	کمینه اندازه ذرات µm	متوسط اندازه ذرات µm
69 ± 1	8±1	23 ± 1

الف) مخلوط مواد

شکل (٦) الف) تصویر SEM و اندازه ذرّات مخلوط مواد (نمونهٔ M) و ب) نرمه چادرملو (نمونهٔ C)



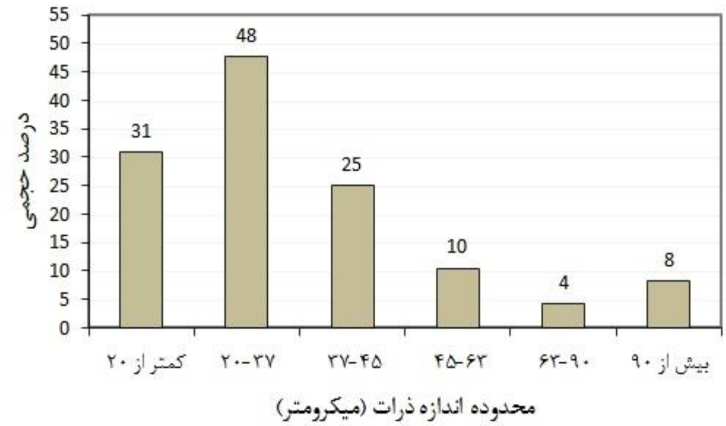
شکل (۷) توزیع اندازه مواد خام گندله مخلوط مواد (نمونهٔ M)



شکل (۸) توزیع اندازه ذرّات پودر خروجی از آسیاب (نمونهٔ A)

جدول (۳) نتایج آزمون PSA برای مخلوط مواد (نمونهٔ M) و بعد از آسیاب (نمونهٔ A)

نوع	میانگین μm	میانه μm	مُد μm	D_{10} μm	D_{50} μm	D_{90} μm	واریانس μm^2	انحراف استاندارد μm
نمونه M	۱۱/۸۰	۱۰/۹۲	۱٤/۰۷	۳/٤۰	۱۱/٥٦	۲۲/۷۹	٤۹/٤۳	۷/۰۳
نمونه A	۱۳/۸٤	۱۳/۱۳	۱٤/۲۳	۳/۹۰	۱۳/۲٤	۲٦/۱۱	٥۹/۷۱	۷/۷۲



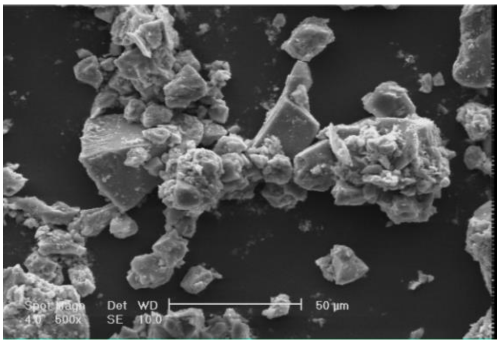
شکل (۹) نمودار توزیع فراوانی اندازه ذرّات حاصل از آزمون غربالگری با الک نمونه A

در شکل (۱۰) تصویر مختلفی از نحوه قرارگیری ذرّات پودر در نمونه M نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ذرّات ریز میکرونی درگیر یکدیگر شده‌اند و به‌صورت توده‌های بزرگ با ابعاد حدود ۱۰۰ میکرونی درآمده‌اند و این امر سبب می‌شود تا در فرایند گندله‌سازی، ذرّات منفرد میکرونی به‌خوبی ایفای نقش ننمایند و علی‌رغم وجود ذرّات ریز در مواد، فرایند گندله‌شوندگی ذرّات با مشکل همراه خواهد بود. در این موارد به‌منظور جبران اُفت کیفی قابلیّت گندله‌شوندگی مواد، مصرف بنتونیت افزایش داده می‌شود. این موضوع خود باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل کاهش عیار گندله، افزایش FeO باقی‌مانده در گندله پخته و افزایش میزان برگشتی دیسک‌های گندله‌سازی به دلیل کاهش اندازه گندله‌های تولیدی می‌شود.

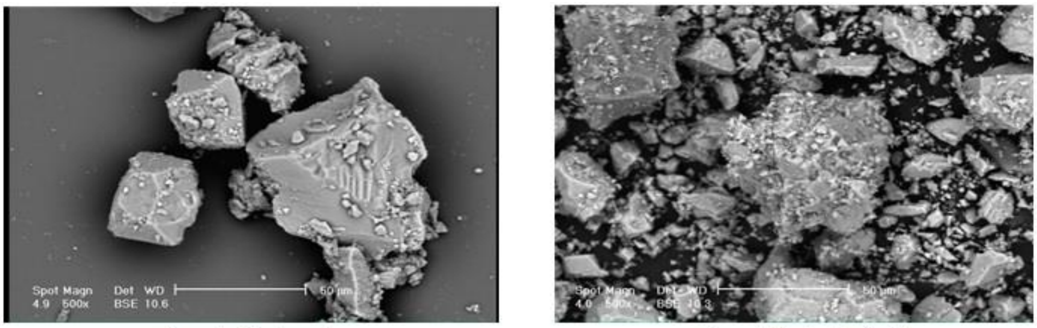
به‌منظور روشن شدن موضوع و اطمینان از صحت نتایج، پس از انجام آزمون اندازه‌گیری توزیع ذرّات با روش غربالگری، ذرّات بیش از ٤٥ میکرون باقی‌مانده روی الک جدا شد و توسّط SEM و PSA مجدداً مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۱۱) تصاویر SEM مربوط به نمونه روی الک بیش از ٤٥ میکرون نشان داده شده است. در تصویر شکل (۱۱– الف) ذرّات قبل از آلتراسونیک و در شکل (۱۱– ب) بعد از آلتراسونیک یا ذرّات از هم جداشده نشان داده شده است. برای پراکنده‌سازی ذرّات، پودر نرمه در الکل اتانول ریخته و سپس به مدت ۱۰ دقیقه تحت امواج آلتراسونیک قرار گرفته است. با مقایسه تصاویر الف و ب مشخص است که ذرّات تا حدودی از یکدیگر فاصله گرفته‌اند اما حضور میکروآگلومره‌ها با وجود انجام آلتراسونیک مشاهده می‌شود (شکل ۱۱– ب). به‌عبارت‌دیگر، ذرّات با پیوند مستحکمی در یکدیگر قفل‌شده و با آلتراسونیک نیز به‌خوبی از یکدیگر جدا نشده‌اند.

علاوه بر این، از روی تصویر SEM، نرمه پس از آسیاب (نمونه A) و باقیمانده روی الک بالای ٤٥ میکرون در آزمون غربالگری و بعد از آلتراسونیک، اندازه ذرّات محاسبه شد (شکل ۱۲). مشاهده می‌شود که متوسط اندازه دانه حدود ۹ میکرون است درحالی‌که این اندازه از ذرّات به‌عنوان ذرّات بالای ٤٥ میکرون روی الک جدا شده است. همچنین در تصویر شکل (۱۳) مشخص است باوجوداینکه نمونه معرف

ذرّات نرمه با اندازه بیش از ٤۵ میکرون روی الک است، اما وجود درصد اندازه ذرّات با اندازه بیش از ۵۰ میکرون خیلی ناچیز است. علاوه بر این، آزمون PSA روی پودر آسیاب‌شده و باقیمانده الک با اندازه بیش از ٤۵ میکرون در آزمون غربالگری انجام شد (شکل ١٤). در جدول (٤) نتایج حاصل از آزمون PSA مشخص شده است. همان‌طور که مشخص است اندازه متوسط ذرّات حدود ١٣ میکرون است و بر خلاف انتظار حدود ۹۰ درصد ذرّات دارای اندازه کم‌تر از ٢٦ میکرون می‌باشند. این موضوع بیان‌گر آن است که ذرّات پودر به دلیل اینکه بیش‌ازحد ریز شده‌اند، دو سازوکار اتصال ذرّات شامل برهم‌کنش‌های بین ذرّات جامد (attractive force between solids) و اتصالات قفل و بستی (interlocking bands) زیاد شده‌اند و نوسانات دستگاه غربالگری الک قادر به فروپاشی آن‌ها نیست.



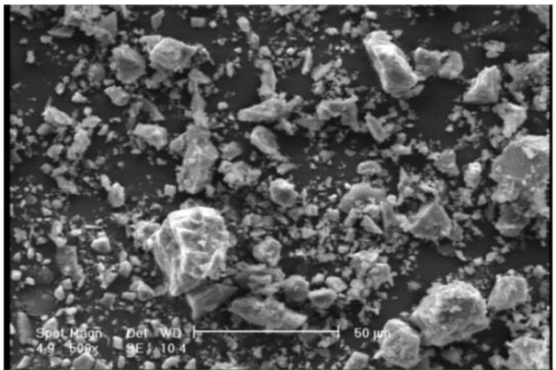
شکل (١٠) تصویر SEM از مخلوط مواد (نمونهٔ M)



الف) قبل از آلتراسونیک

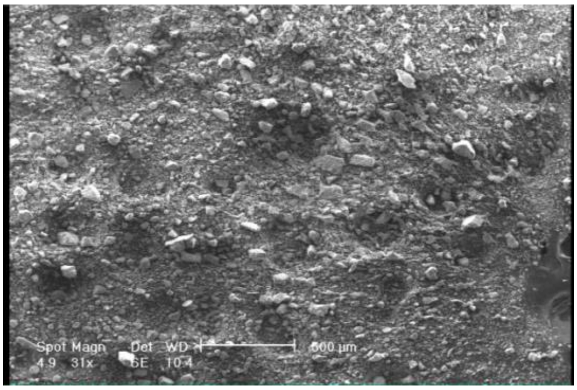
ب) بعد از آلتراسونیک

شکل (١١) تصویر SEM از نمونهٔ A باقی‌مانده روی الک بالای ٤۵ میکرون در آزمون غربالگری قبل (الف) و بعد از آلتراسونیک (ب)

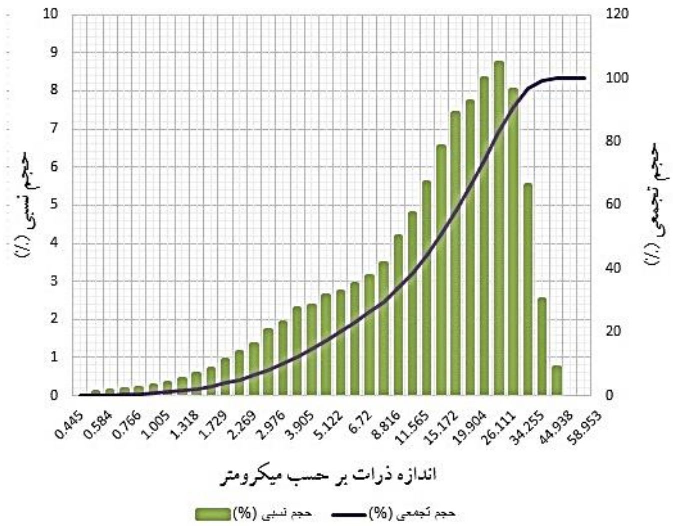


اندازه متوسط ذرات μm	کمینه اندازه ذرات μm	بیشینه اندازه ذرات μm
9 ± 1	2 ± 1	25 ± 1

شکل (١٢) تصویر SEM و اندازه ذرّات خروجی آسیاب (نمونهٔ A) و باقیمانده روی الک بالای ٤۵ میکرون



شکل (۱۳) تصویر SEM نرمه پس از آسیاب (نمونهٔ A) و باقیمانده روی الک بالای ٤٥ میکرون



شکل (١٤) توزیع اندازه ذرّات بعد از آسیاب (نمونهٔ A) و باقیمانده روی الک بالای ٤٥ میکرون

جدول (٤) نتایج آزمون PSA برای خروجی آسیاب (نمونهٔ A) و باقیمانده روی الک بالای ٤٥ میکرون

میانگین μm	میانه μm	مُد μm	D_{10} μm	D_{50} μm	D_{90} μm	واریانس μm^2	انحراف استاندارد μm
۱۳/۷۷	۱۳/۰۲	۲۱/۲٤	۲/۹۷	۱۳/۲٤	۲٦/۱۱	۷۲/۸٦	۸/۵۳

بنابراین نتیجه می‌شود که وجود ذرّات بسیار ریز موجود در کنسانتره (کم‌تر از ۱۰ میکرون) موجب شده که میکروآگلومرها تشکیل شوند و با نتایج آزمون غربالگری کاملاً متفاوت باشد. ریز شدن بیش‌ازحد ذرّات به فرایند آسیاب‌کردن برمی‌گردد. در این فرایند، مخلوط مواد ورودی به آسیاب، ترکیبی از مواد با سختی‌های مختلف و آسیاب‌پذیری متفاوت است. همچنین آسیاب مورد استفاده در شرکت فولاد مبارکه از نوع خشک با سیکل بسته است و باید رطوبت مواد ورودی به آسیاب، در قسمت خشک‌کن آسیاب حذف شود. به همین دلیل در عمل مشکلاتی از قبیل انسداد ورودی آسیاب به هنگام افزایش شارژ مواد ورودی وجود خواهد داشت. به‌طورکلی جهت اصلاح توزیع اندازه ذرّات خروجی از آسیاب می‌توان با کنترل میکس مواد ورودی به آسیاب (ازلحاظ سختی و دانه‌بندی) و همچنین کنترل مواد

برگشتی به آسیاب، فرایند آسیاب‌کردن را اصلاح نمود.

درصورتی‌که اندازه و توزیع اندازه ذرّات مناسب باشد علاوه بر نیروی ویسکوز سیال، نیروی موئین هم در استحکام گندله و رشد آن اثر دارد (شکل ۱۵–الف). اما حضور میکروآگلومره‌ها در مخلوط مواد موجب می‌شود که شعاع منافذ لوله‌های موئین افزایش یابد. همان‌طور که در رابطه (۱) مشخص است با افزایش شعاع منافذ لوله موئین (افزایش اندازه ذرّات)، فشار ناشی از دیواره موئینگی بر ذرّات کاهش می‌یابد [3]. بنابراین در این شرایط نیروی موئین که کنترل‌کننده فرایند رشد گندله در دیسک است به حداقل میزان خود می‌رسد (شکل ۱۵–ب).

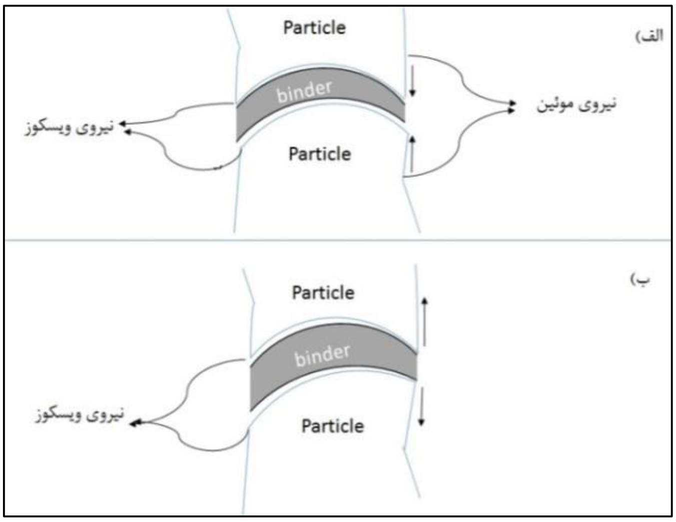
بااین‌حال با وجود نرمه‌های بسیار ریز و تشکیل میکروآگلومره در مخلوط مواد، یک روش ساده جهت بهبود قابلیّت گندله‌شوندگی مواد می‌تواند افزایش سهم نیروهای ویسکوز در بین ذرّات به هنگام تشکیل گندله خام در دیسک‌های گندله‌سازی باشد. برای این منظور استفاده از چسب‌های آلی و در صورت امکان جایگزینی آن با بنتونیت می‌تواند به‌عنوان یک راهکار بکار گرفته شود.

در شکل (۱٦) منحنی جذب- واجذب فیزیکی (Physisorption) گاز نیتروژن هم‌دما (۷۷ کلوین) را برای نرمه چادرملو (نمونه C) و مخلوط مواد (نمونهٔ M) نشان می‌دهد. هر دو منحنی بر اساس طبقه‌بندی IUPAC از نوع III هستند و بیان‌گر تعامل کم بین ماده جذب‌شونده و ماده جاذب است [14]. همچنین نشان می‌دهد که نیروی جذب در هر دو پودر بسیار ضعیف است و ماده متخلخل نیست. به‌عبارت‌دیگر مقدار حفرات موجود در سطح ذرّات اندک است و جذب گاز را محدود نموده است. همچنین شکل منحنی هیسترزیس در هر دو پودر از نوع H3 است (طبق IUPAC) که نشان‌دهنده وجود مزوحفرات (mesopore) بسیار کم و تقریباً شیاری (slits) شکل است [14]. لذا عدم وجود تخلخل در ذرّات و حضور نیروهای مختلف الکتریکی، الکترواستاتیکی و مغناطیسی در بین ذرّات بسیار ریز، سبب تجمع ذرّات در کنار یکدیگر و تشکیل توده‌های کوچک (میکروآگلومره) به‌منظور کاهش انرژی سطحی و رسیدن به سطح پایداری لازم شده است.

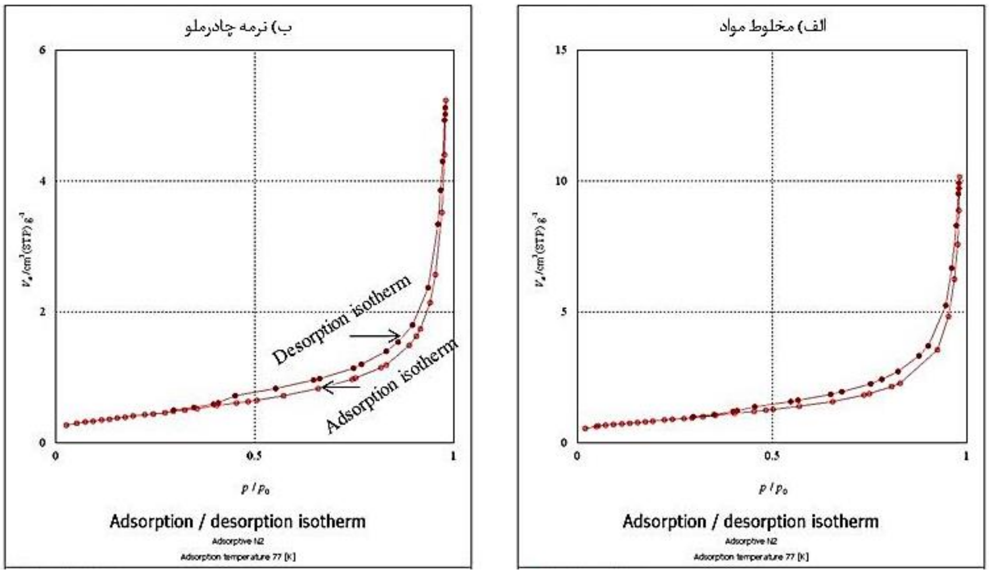
توزیع اندازه تخلخل‌ها با استفاده از تئوری BJH نیز به‌دست‌آمده که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود. مشخص است که اندازه حفره‌ها تا حدود بیش از ۱۰ نانومتر توسعه یافته‌اند و دارای توزیع وسیعی از تخلخل نیستند. این موضوع نشان‌دهنده تخلخل کم در هر دو نمونه است. همچنین در جدول (۵) نتایج حاصل از آزمون BET مشاهده می‌شود. مشخص است که بین شعاع متوسّط تخلخل در هر دو نمونه تفاوت چندانی وجود ندارد. اما ملاحظه می‌شود که حجم ویژه کل تخلخل در نمونهٔ M نسبت به نمونهٔ C بیشتر شده است که این امر ناشی از حضور ذرّات بسیار ریز آسیاب‌شده در مخلوط مواد (نمونهٔ M) است.

به‌طورکلی باید برای کنترل رشد و استحکام تر گندله در این شرایط باید با افزودن چسب‌هایی با ویسکوزیته بالا نیروی چسبندگی بین ذرّات را افزایش و مکانیزم رشد گندله بر اساس چسبندگی ذرّات توسّط نیروی ویسکوز تغییر یابد. اگرچه بنتونیت ویسکوزیته را افزایش می‌دهد، اما مصرف بیش‌ازحد آن باعث کاهش عیار گندله نهایی می‌شود. یکی از راه‌حل‌های عملیاتی افزودن چسب‌های آلی ویسکوز مانند کربوکسیل‌متیل سلولوز (CMC) به بنتونیت است که ترشوندگی بالایی هم دارد (شکل ۵). چسب آلی CMC یک ماده شیمیایی است که در آب سرد حل می‌شود و باعث افزایش ویسکوزیته و کشش سطحی سیال می‌شود. اثر اصلی ویسکوزیته مایع، روی نرخ رشد گندله خام است و اثر چندانی بر جوانه‌زنی ندارد. به‌طورکلی با افزایش ویسکوزیته سیال، نرخ رشد گندله به دلیل کاهش تحرک آب خالص کم می‌شود [2]. به‌عبارت‌دیگر، برای شروع اولیه رشد، چسب مایع باید به سطح ذرّه چسبیده و فشرده شود. به‌طورکلی ویسکوزیته سیال موجب می‌شود که نرخ رشد گندله کاهش یابد؛ اما از طرف دیگر موجب افزایش استحکام (نیروی اتصال) چسب بر اساس مکانیزم نیروی ویسکوز می‌شود. بنابراین ویسکوزیته سیال باید در یک حد بهینه قرار بگیرد. البتّه لازم به ذکر است که اثر تغییرات ویسکوزیته بر نیروی ویسکوز چسب بیش‌تر از اثر ویسکوزیته بر نرخ رشد گندله

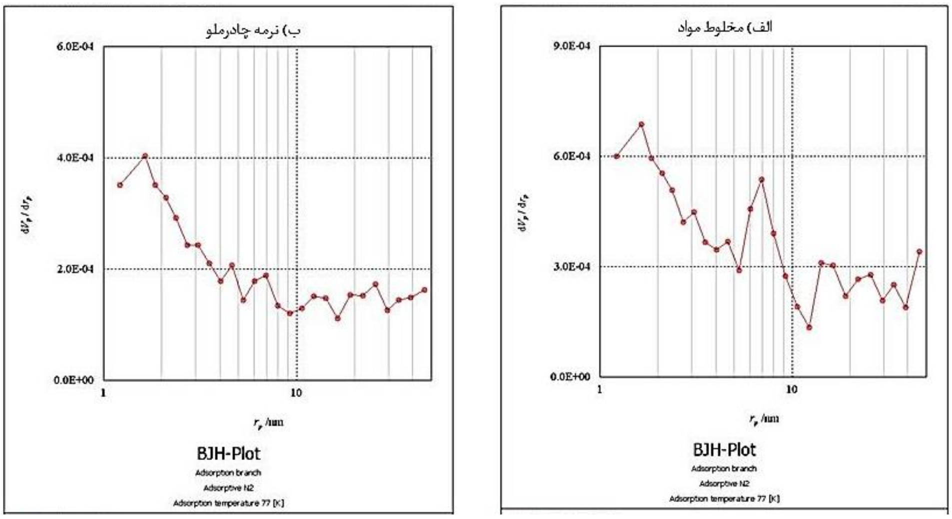
است، لذا افزایش ویسکوزیته سیال نمی‌تواند نرخ رشد گندله را خیلی تحت الاشعاع خود قرار دهد [15]. به‌عنوان‌مثال افزایش بنتونیت از ۰ به ۱ درصد موجب کاهش اندازه گندله از ١٤ به ١٢ میلی‌متر می‌شود (کاهش نرخ رشد) که در حد استاندارد است، اما حضور ۰/۵ درصد بنتونیت باعث افزایش بیش از ۱۰ برابر استحکام گندله خام می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که اثر نیروی ویسکوز بر استحکام گندله بیشتر از اثر نیروی موئینگی بر استحکام است. البتّه باید به این نکته توجّه شود که اگر بر اساس افزایش نیروی ویسکوز مقدار چسب آلی یا بنتونیت بیش‌ازحد مورد نیاز مصرف شود، توزیع چسب در کل گندله کم می‌شود و اثر معکوس بر استحکام و عدم افتادن دارد [۱۵].



شکل (۱۵): طرح‌واره حضور دو نیروی ویسکوز و موئین در شرایط الف) توزیع مناسب اندازه ذرّات و ب) تشکیل آگلومره‌ها و درنتیجه رشد منافذ لوله موئین



شکل (١٦): منحنی جذب و واجذب ایزوترم نیتروژن برای مخلوط مواد (الف) و نرمه چادرملو (ب)



شکل (۱۷) نمودار توزیع اندازه شعاع حفرات در مخلوط مواد (الف) و نرمه چادرملو (ب)

جدول (۵) نتایج آزمون BET برای نرمه چادرملو و بعد از میکسر (مخلوط مواد)

مشخصه	نرمه چادرملو	مخلوط مواد
حجم ویژه کل تخلخل cm^3/g	۸/۰۹×۱۰$^{-۳}$	۱۵/۰۷×۱۰$^{-۳}$
سطح ویژه m^2/g	۱/۵۱	۳/۰۰
شعاع متوسّط تخلخل nm	۲۱/۳۶	۲۰/۹۱
حجم بزرگ‌ترین حفره cm^3/g	۷/۸۲×۱۰$^{-۳}$	۱۴/۱۴×۱۰$^{-۳}$
سطح بزرگ‌ترین حفره m^2/g	۱/۶۹	۳/۰۸
شعاع بزرگ‌ترین حفره nm	۱/۶۴	۱/۶۴

نتیجه‌گیری

۱. سنگ معدن چادرملو با عیار بالا در تماس با آب مقطر و محلول چسب آلی CMC دارای کم‌ترین زاویهٔ ترشوندگی (حدود ۲۰ درجه) است.

۲. حضور مواد باطله در سنگ معدنی چادرملو موجب افزایش زاویهٔ ترشوندگی آب مقطر از ۷ درجه به ۲۰ درجه می‌شود.

۳. باوجود مواد باطله کم در سنگ معدنی سنگان مشاهده شد که زاویهٔ ترشوندگی (برای آب فرایند ۶۱ درجه) بیش‌تری نسبت به چادرملو عیار پایین (برای آب فرایند ۲۴ درجه) دارد. این موضوع به خاطر ژنز خود سنگ سنگان است.

۴. نتیجه شد که چسب آلی CMC دارای زاویهٔ تر شوندگی کم‌تری نسبت به دیگر محلول‌ها دارد (حدود ۲۰ درجه).

۵. نتایج توزیع اندازه آزمون غربالگری با الک نشان داد که بیش‌ترین درصد حجمی اندازه ذرّات در محدودهٔ ۲۰ الی ۳۷ میکرون است. این در صورتی است که نتایج SEM و PSA بیش‌ترین محدوده اندازه ذرّات را برای همه نمونه‌ها حدود ۱۰ میکرون نشان دادند.

۶. نتایج آزمون BET نشان داد که تخلخل در سطح ذرّات کنسانتره‌های چادرملو و مخلوط مواد بسیار کم است و ریز شدن بیش‌ازحد ذرّات باعث تجمع ذرّات و تشکیل میکروآگلومره‌ها در بین ذرّات پودر می‌شود.

۷. وجود ذرّات بسیار ریز در نرمه (کم‌تر از ۱۰ میکرون) موجب تداخل در نتایج اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرّات با روش غربالگری می‌شود.

مراجع

1. Seija Forsmo/B. Bjorkman, "Influence of green pellet properties on pelletizing of magnetite iron ore", Doctoral Thesis, Lulea University of Technology Department of Chemical Engineering and Geosciences (2007).
2. S. Forsmo, A. Apelqvist, B. Bjorkman and P.O. Samskog, "Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder", *Powder Technology*, Vol. 169, pp. 147-158, (2006).
3. S.M. Iveson, S. Holt and S. Biggs, "Contact angle measurements of iron ore powders", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 166, pp. 203-214, (2000).
4. Wolfgang Pietsch, "Agglomeration processes phenomena, technologies, equipment", Koppern & Hattingen, Germany, (2002).
5. E. Potapova, "Studies on the adsorption of flotation collectors on iron oxides", Lule Tekniska Universitet, (2009).
6. O. Sivrikaya and A.h. Arol, "The bonding/strengthening mechanism of colemanite added organic binders in iron ore pelletization", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 110, pp. 90-100, (2012).
7. G. Qiu, T. Jiang, H. Li and D. Wang, "Functions and molecular structure of organic binders for iron ore pelletization", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 224 11-22, (2003).

۸. رابرت پلک، "تک فرایندهای متالورژی استخراجی"، مترجمین علی سعیدی و ابوالفضل امیرکاوئی، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان، (۱۳۸۹).

9. J. Pal, S. Ghorai, S. Agarwal, B. Nandi, T. Chakraborty, G. Das and S. Prakash,"Effect of blaine fineness on the quality of hematite iron ore pellets for blast furnace", *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, Vol. 36, pp. 83-91, (2015).
10. E.C. Donaldson and W. Alam," Wettability", Gulf Publishing Company, Houston,(2008).
11. S. Forsmo, P.O. Samskog, and B. Bjrkman, "A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness", *Powder Technology*, Vol. 181, pp. 321-330 (2008).
12. A. Saidi, M. Shamanian, M. Barati and K. Azari,"Hyperactivation of bentonite in pelletizing process", *International Journal of ISSI*, Vol. 1, pp. 38-4, (2004).
13. N.A. Spaldin, "Magnetic materialas-fundamentals and applications", Cambridge University Press, New York, (2011).
14. S. Lowell, J.E. Shields, M.A. Thomas and M. Thommes, "Characterization of porous solids and powders: surface area pore size and density", Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, (2004).
15. G. Qiu, T. Jiang, X. Fan, D. Zhu and Z. Huang, "Effects of binders on balling behaviors of iron ore concentrates", *Scandinavian journal of metallurgy*, Vol. 33, pp. 36-46 (2004).